

УДК 621.9.02-19; 621.9.06.001.4

В.П. Ларшин, д-р техн. наук, Н.В. Лищенко, канд. техн. наук,
Одесса, Украина

МОНИТОРИНГ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА НА СТАНКАХ С ЧПУ

Показано місце нового напрямку в технології машинобудування – моніторингу та технологічної діагностики на верстатах з ЧПК, в порівнянні з класичними методами цієї науки: методом пробних проходів та промірів, і методом автоматичного отримання розмірів. Встановлено важливість вбудованих систем моніторингу та технологічної діагностики в забезпеченні високої продуктивності праці за рахунок забезпечення самодостатності, автономності та мобільності верстатів з ЧПК на етапах їх налагодження і функціонування.

Ключові слова: моніторинг, технологічна діагностика, теоретико-імовірнісний підхід, параметри стану, технологічна система

Показано место нового направления в технологии машиностроения – мониторинга и технологической диагностики на станках с ЧПУ, в сравнении с классическими методами этой науки: методом пробных проходів и промеров, и методом автоматического получения размеров. Установлена важность встроенных систем мониторинга и технологической диагностики в обеспечении высокой производительности труда за счёт обеспечения самодостаточности, автономности и мобильности станков с ЧПУ на этапах их наладки и функционирования.

Ключевые слова: мониторинг, технологическая диагностика, теоретико-вероятностный подход, параметры состояния, технологическая система

It is shown the place of a new direction in mechanical engineering – monitoring and cutting diagnostics on CNC machines, in comparison with the classical methods of the science: method of test passes and measurements and that with automatically received sizes. It is established the importance of embedded systems for monitoring and cutting diagnostics to ensure high productivity at the expense of self-sufficiency, autonomy and mobility of the CNC machine tools in the stages of their setting up and operation.

Keywords: monitoring, technological diagnostics, probability-theoretic approach, state parameters, manufacturing system

1. Постановка проблемы. Появление многофункциональных станков с ЧПУ, типа обрабатывающий центр, позволило резко увеличить производительность технологических операций за счёт обеспечения самодостаточности, автономности и мобильности технологических систем с программным управлением при минимальном участии оператора станка в выполнении всех этапов технологической операции. Автоматизация и программирование всех рабочих движений станка (основных и вспомогательных), включая измерительные процедуры на этапе наладки станка и послеоперационный контроль заготовки при помощи встроенной измерительной системы, осуществляются при едином централизованном

управлении от контроллера ЧПУ (CNC controller). Технологическим преимуществом при этом является измерение и обработка заготовки от одних и тех же технологических баз. За счёт указанной многофункциональности станка появилась также возможность предварительно обработать эти базы на том же самом станке, а затем от них продолжить обработку исполнительных поверхностей заготовки. Встроенные системы мониторинга и технической диагностики позволяют оператору станка судить о нормальной его работе, которая выполняется при закрытой для наблюдения рабочей зоне. Это вызвано не только требованиями техники безопасности, но также, необходимостью подачи под давлением СОЖ в зону резания.

Повышение интенсивности работы мехатронных станков часто приводит к дополнительной потере времени из-за отказов и износа режущего инструмента, особенно это касается шлифовального инструмента на станках с ЧПУ. Определение оптимального момента правки шлифовальных кругов возможно только на основе контроля параметров состояния процесса шлифования и установления связи между ними и выходными параметрами технологической системы (качество и точность деталей). Эта проблема и связанные с ней задачи должны быть решены не только на уровне разработки конкретных устройств, но также принципиально на основе научных подходов и методов технологического анализа.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Согласно теории автоматизации оборудования с ЧПУ, система мониторинга и диагностики должна иметь полную интеграцию с контроллером ЧПУ, чтобы достичь эффективной автоматизации процесса обработки (рис.).

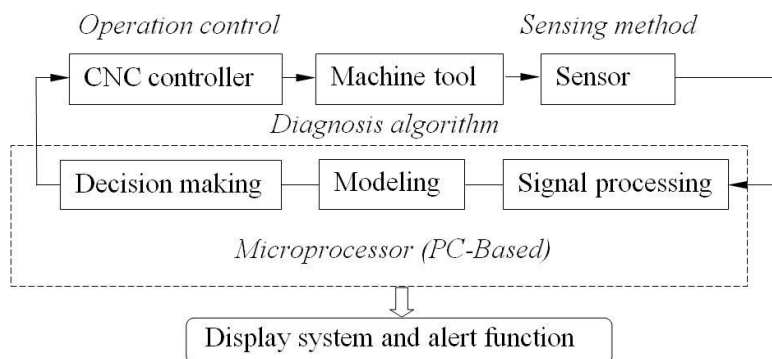


Рисунок – Онлайн мониторинговая система для станка с ЧПУ [1]

Однако, существующие CNC контроллеры являются закрытыми системами по отношению к контролю состояния станочного инструмента. Поэтому дальнейшие исследовательские работы по встроенным системам мониторинга и технологической диагностики актуальны в технологии машиностроения. В технологической системе (manufacturing system) обычно рассматривают четыре главных элемента: режущий инструмент, процесс обработки, заготовку и сам металлорежущий станок [1]. Для эффективного функционирования технологической системы важны все указанные элементы, но прежде всего, следует обратить внимание на режущий инструмент. Его поломка или износ напрямую и существенно отражаются на качестве продукта. Следовательно, решающее значение для автоматизации процесса механической обработки приобретает контроль текущего состояния инструмента и выявление его отказа, который происходит неожиданно (лезвийный инструмент) или постепенно (абразивный инструмент) и отражается катастрофически на заготовке или на дорогостоящем станке с ЧПУ. Успешное выполнение мониторинга состояния инструмента зависит от двух факторов: (1) от качества информации, поступающей от мониторинговых датчиков (monitoring sensors), и (2) от алгоритма диагностики, использованного для анализа данных, снимаемых с этих датчиков (sensory data) для принятия надлежащего решения. В этой связи актуальны исследования по определению типа и числа использованных датчиков, а также по установлению алгоритмов обучения и принятия решения, чтобы связать информацию датчиков (sensory information) с идентификацией состояния технологической системы или процесса обработки (process state). В технике автоматизации появилось направление сенсорной интеграции (sensor fusion), которое основано на получении информации от более, чем одного датчика [1].

Диагностика состояния инструмента это не единственная задача; важное значение имеет информация о результатах обработки деталей на станках с ЧПУ. Например, информация о параметрах качества обработанной поверхности, которые оказывают влияние на эксплуатационные свойства этих деталей [2] или результаты послеоперационного контроля, например, на зубошлифовальном станке с ЧПУ. На качество поверхности оказывают влияние режимы резания, которые могут быть проконтролированы и учтены заранее. Однако многие другие условия резания остаются вне контроля: влияние СОЖ, износ инструмента, свойства обрабатываемого материала, силовой и температурный фактор в зоне резания и т.п. В связи с этим следует отметить исследования, позволяющие прогнозировать результаты обработки на основе информации от встроенных датчиков (sensor fusion) и математических методов цифровой обработки этих сигналов для представления унифицированной информации о состоянии технологической

системы. Для этого используются новые подходы и методы моделирования, которые можно разделить на ряд групп в зависимости от исходных теорий, лежащих в их основе. К числу таких теорий относятся: теория резания и технология машиностроения, теория планирования и проведения экспериментальных исследований, теория искусственного интеллекта [2].

Из сказанного вытекает необходимость установить связь описанных тенденций обеспечения самодостаточности, автономности и мобильности технологических систем с классическими подходами в технологии машиностроения, и дать характеристику новых возникающих при этом направлений и задач, привести примеры решения некоторых из этих задач.

3. Целью исследования является технологический анализ современных тенденций в технологии машиностроения, связанных с обеспечением самодостаточной, автономной и мобильной работы станков с ЧПУ в гибком автоматизированном производстве.

4. Материалы исследований. В соответствии с теорией технических систем имеются два вида этих систем: системы – конструкции и системы – процессы. Причем, взаимодействие этих систем таково, что системы – конструкции предназначены для реализации систем – процессов. К числу наук о процессах, обеспечивающих требуемый технологический результат (количество и качество продукции, сроки изготовления при наименьшей трудоёмкости и себестоимости), относится технология машиностроения. По определению проф. Маталина А.А. технология машиностроения – это наука об изготовлении машин требуемого качества в установленном производственной программе количестве и в заданные сроки при наименьших затратах живого и овеществлённого труда, т.е. при наименьшей себестоимости [3]. По сути, этим определением сформулирована задача оптимизации технологических процессов и систем. Объектом технологии машиностроения являются технологические процессы изготовления машиностроительной продукции и прежде всего процессы и операции обработки и сборки. Частью этих процессов является собственно процесс взаимодействия элементов технологической системы, который определяет затраты основного (машинного) времени.

Технологический анализ, как метод научного исследования в технологии машиностроения, обычно выполняют на этапах производства и его подготовки (технологическая подготовка производства), которые являются этапами жизненного цикла изделия. На обоих этих этапах используется математический аппарат теории оптимизации, которая является, соответственно, методом управления по отношению к выполняемому процессу (этап производства) и методом проектирования этого процесса (этап подготовки производства). При необходимости проверить и уточнить

результаты технологического проектирования оптимизацию используют также как метод планирования эксперимента. Здесь следует отметить, что в зарубежной литературе вместо термина «планирование эксперимента» используют термин «проектирование эксперимента» (experiment design). В этом смысле оптимизация является не только методом проектирования технологических процессов и систем, но также методом проектирования экспериментальных исследований, которые являются неотъемлемой частью технологии машиностроения.

Как правило, технологический анализ основан на элементах инженерной физики (теплофизика и динамика), которые иногда называют технологическими. Эти направления соответствуют природе явлений, происходящих при механической обработке (температурный и силовой фактор), и являются научной основой обеспечения эксплуатационных характеристик изделий машиностроения. В свою очередь технологии машиностроения как науке о процессах соответствуют два общенаучных подхода: теоретико-вероятностный [4] и частотный [5]. В соответствии с теоретико-вероятностным подходом, который можно назвать технологической статистикой, любой параметр процесса может быть систематической (детерминированной), случайной или композиционной (смешанной) величиной. Поскольку параметры реального процесса редко могут быть детерминированными, то в этом смысле детерминированная величина может описывать некий абстрактный, виртуальный, реально не существующий процесс. Выводы, которые можно извлечь из моделирования детерминированного процесса могут оказаться полезными для практики, если они касаются каких-либо установленных тенденций. Случайная величина также может иметь место в технологическом анализе, например, при оценке и моделировании припуска на обработку, шероховатости обработанной поверхности, при анализе вибраций в упругой системе металлорежущего станка. Имеется соответствующий математический аппарат теории случайных процессов, который используют для принятия технологических решений. В этом случае рассматриваемые технологические параметры, например, припуск на обработку или параметры шероховатости являются статистическими, т.е. не детерминированными. Следовательно, они определяются законами распределения случайной величины, например, законами распределения Гаусса, Стюдента и т.п.

Как правило, в исследованиях технологических параметров, их рассматривают как параметры, состоящие из двух составляющих: систематической (детерминированной) составляющей и случайной. Основные технологические закономерности проявляются в изменении детерминированной составляющей (например, при многофакторном планировании эксперимента), а случайная составляющая является при этом

«шумовой» и характеризует надежность оценки устанавливаемой закономерности. По этой причине теоретико-вероятностный подход по своей сути и математическому аппарату соответствует реальным технологическим процессам, в том числе на настроенных станках и станках с ЧПУ.

Соответствие частотного подхода природе параметров технологических процессов механической обработки, т.е. изменению технологических параметров во времени, следует из принципиальной сущности интегрального преобразования Фурье, предназначенного для трансформации временных параметров процесса в частотные параметры (прямое преобразование Фурье) и обратно из частотных параметров во временные параметры (обратное преобразование Фурье). Частотное представление технологических параметров позволяет принимать эффективные технологические решения путем внесения соответствующих корректив в передаточные функции технологической системы. Например, коррективы в режимы резания могут быть внесены для обеспечения устойчивой работы технологической системы, т.е. для вывода её из неустойчивого состояния. Другим примером эффективности частотного подхода является разделение спектра неровностей обработанной поверхности на частотные составляющие, которые соответствуют категориям шероховатости, волнистости и отклонениям формы профиля. Эту математическую операцию производят с помощью цифровых фильтров, в том числе фазокорректирующих, или на основе цифровой операции сглаживания сигнала, характеризующего профиль обработанной поверхности [6].

Положительным качеством рассматриваемой методологии двух подходов (теоретико-вероятностного и частотного) является естественное взаимодействие этих подходов, поскольку результаты теоретико-вероятностного моделирования (математического описания) технологических параметров и результаты их экспериментального измерения могут быть подвергнуты частотному преобразованию Фурье. При этом возможны следующие случаи: систематическая составляющая сигнала превалирует над случайной составляющей сигнала или не превалирует. В первом случае, говорят, например, о периодическом сигнале. В противном случае (случайная составляющая сигнала больше систематической составляющей) говорят об аperiodическом сигнале. Количественное соотношение между систематической и случайной составляющими выявляют с помощью автокорреляционной функции исходного сигнала [7].

Практика технологических исследований подтверждает правомерность представления сигнала технологического назначения в виде суммы систематической (периодической, полигармонической) и случайной (aperiodической) составляющих. Например, по этому принципу построены европейские (ISO) или американские (ASME) стандарты по шероховатости,

волнистости и отклонению формы поверхности. Такой принцип позволяет, например, установить взаимосвязь между периодическими сигналами вибраций и волнистостью обработанной поверхности.

Для временных сигналов с превалирующей систематической составляющей их частотное представление по Фурье имеет вид дискретного спектра, т.е. каждой явно выраженной амплитуде гармоники соответствует определенная частота. Поэтому, обратное преобразование Фурье может быть выполнено путём суперпозиции соответствующих явно выраженных и дискретных гармонических составляющих. Амплитуду этих составляющих берут из амплитудно-частотной характеристики сигнала, а фазу – из его фазочастотной характеристики.

Особенностью технологических исследований является ограниченный временной интервал наблюдения сигнала, характеризующего технологический параметр. Например, запись вибраций в упругой системе металлорежущего станка производят на дискретных, ограниченных по времени интервалах времени длительностью 0,2 секунды при частоте дискретизации исходного временного сигнала 50 кГц. Этот незначительный по длительности временной интервал (0,2 с) преобразуют в соответствующий спектр сигнала и наблюдают за изменением частотных параметров сигнала во времени. При этом текущее время складывается из суммы интервалов длительностью 0,2 с. При измерении припуска на отдельных впадинах зубчатого колеса весь интервал изменения припуска характеризуется длиной измерительной окружности $2\pi R$, где R – радиус измерительной окружности заготовки. Ещё одним примером ограниченности сигнала может быть ограниченность длины трассирования при измерении щупом параметров профиля поверхности. Указанная ограниченность временного интервала наблюдения процесса приводит к нескольким сложностям применения указанных методологических подходов. Во-первых, представление любой временной периодической функции в виде дискретного спектра, т.е. в виде ряда Фурье, возможно, если указанная функция существует в бесконечном по длительности интервале времени. Всякое ограничение этого интервала (по времени или координате) нарушает требование бесконечности наблюдаемого процесса (периодического или аperiodического). Это приводит к невозможности гармонического представления сигнала в виде ряда Фурье (или дискретного частотного спектра). В этом случае преобразование Фурье выражается интегралом Фурье. Оно даёт непрерывный спектр в функции частоты изменения сигнала. Аналогом дискретной амплитуды сигнала в спектре является спектральная плотность сигнала. Во-вторых, при ограниченном (по времени или координате) сигнале этот сигнал часто содержит некую постоянную составляющую, имеющую ту же самую ограниченную протяжённость по времени или координате. Из

свойства линейности преобразования Фурье, следует, что выходной частотный спектр будет содержать спектральную часть от одиночного прямоугольного импульса, длина которого равна указанному отрезку времени или координаты. Спектр этого сигнала является непрерывным и описывается функцией $\text{sinc}(x)$. Этот спектр может превалировать над спектром переменной части сигнала, что сведет на нет результаты частотного анализа сигнала. В-третьих, задачей является выбор частоты дискретизации исходного сигнала, исходя из требуемого диапазона частот этого сигнала в его частотном представлении.

Для выявления новой тенденции в технологии машиностроения как науки о процессах (проектирование процесса, управление ходом процесса в технологической системе, оптимизация процесса) рассмотрим элементы новой методологии. Технологическая операция является законченной частью технологического процесса. Таким образом, предыдущие операции задают ей начальные условия через исходное состояние предмета труда – заготовки. Поэтому операция как процесс во времени имеет вход, текущее состояние и выход. Причем вход операции имеет двойственное содержание. Во-первых, это исходное состояние заготовки, которая поступила на эту операцию. В исходном состоянии заготовки отражены все предыдущие операции и условия, в которых они были проведены. Во-вторых, входом в операционный процесс являются заданные режимы обработки, которые определяют на этапе подготовки производства, исходя из нормального протекания всех операций. Нормальное – это означает, что рассматриваются математическое ожидание всех параметров заготовки (размеров, твердости) и заданные отклонения от этого математического ожидания, которые в технологии машиностроения характеризуют соответствующими допусками. Таким образом, допуски на геометрические параметры заготовки характеризуют случайную (неконтролируемую) составляющую этих параметров. Очевидно, что это следствие неконтролируемых параметров соответствующих процессов обработки (контролируемых и неконтролируемых), включая внешние условия их выполнения. В этих параметрах процессов также есть доля случайной составляющей. Таким образом, параметры заготовки рассматривают как статистические, а не детерминированные величины. Отклонения от математического ожидания параметров (допуск) в конструкции заготовки вызвано соответствующими отклонениями параметров процессов её обработки. Поэтому технология машиностроения как наука о процессах строится по принципу регламентирования как получаемого параметра (например, размера), так и отклонения от него. Такой подход находит отражение в регламентации промежуточных (операционных) размеров и допусков на них. Для согласования последовательности операций имеется соответствующая система учёта размеров и допусков на них, которая

называется размерный анализ. Эта система учета является избыточной с точки зрения величин допусков на размеры, поскольку чаще всего построена по принципу полной взаимозаменяемости. Это означает, что рассматриваются случаи, когда сумма уменьшающих звеньев размерной цепи является минимальной, а сумма увеличивающих звеньев размерной цепи является максимальной. Причем известно, что вероятности этих событий ничтожно малы. Следовательно, наиболее вероятное событие заключается в том, что сумма уменьшающих составляющих размерной цепи не будет минимальной, также как и сумма увеличивающих элементов размерной цепи не будет максимальной. Для обоих указанных случаев указанные суммы будут наиболее вероятными, что применительно к размерам заготовки означает их наиболее вероятное значение при распределении этих размеров по нормальному закону. Этот факт теоретически утверждается центральной предельной теоремой (Central Limit Theorem), которая является базовым понятием в теории вероятности, поскольку расширяет область действия нормального закона распределения случайных величин. Центральная предельная теорема имеет несколько вариантов, названных именами соответствующих авторов. Например, в соответствии с вариантом этой теоремы, разработанным А.М. Ляпуновым (Lyapunov CLT) среднее достаточно большой выборки независимых одинаково (или неодинаково) распределённых случайных величин будет приблизительно нормально распределённым.

Естественно, что без дополнительной информации о процессе, которая появляется по результатам соответствующего контроля и диагностики этого процесса, технологи вынуждены создавать избыточность по припуску и по допуску на промежуточные размеры заготовки. Поэтому без получения дополнительной информации о процессе, технологии обработки на настроенных станках в принципе являются трудоёмкими, т.к. связаны с удалением завышенных припусков, которые в свою очередь складываются из завышенных допусков на промежуточные размеры. Это следует из алгоритма размерного анализа, в соответствии с которым определяют размеры исходной заготовки с учётом её промежуточных размеров. Альтернативный метод – метод пробных проходов и промеров отличается от описанного выше отсутствием избыточности, но требует индивидуального подхода на каждом рабочем месте по ходу технологического процесса. И в этом смысле по затратам времени и денежным затратам этот метод тоже является трудоёмким, поскольку он основан на интеллекте рабочих-операторов и многолетнем их опыте поиска решений для большого количества возникающих индивидуальных состояний процесса обработки. Поэтому в последнее время развивается новое направление в технологии, основанное на использовании преимуществ каждого из указанных выше

методов обеспечения точности обработки. Это направление связано с мониторингом и диагностикой технологических систем (процессов и операций), которое в свою очередь содержит ряд новых идей: многосенсорность (sensor fusion), диагностика состояния инструмента, статистическая обработка сигналов о процессе для выделения полезной информации из зашумленных сигналов, цифровая обработка сигналов (фильтрация, сглаживание, предсказание тренда и т.п.). Некоторые из этих направлений развиваются самостоятельно: статистический контроль качества (Statistical Quality Control), теория оценивания (включает сглаживание, фильтрацию и предсказание сигналов о процессе на основе их цифровой обработки).

Новое направление в технологии машиностроения основано на кибернетическом подходе к понятию «система» (в данном случае технологическая система), которое характеризуется входом, состоянием и выходом. Выше было сказано, что состояние процесса статистически отражается на состоянии заготовки (косвенная оценка параметров конструкции заготовки через параметры процесса её изготовления). Кроме того, возможно, получение прямой информации о величине конструктивных параметров заготовки при наличии в технологической системе прямого измерения и контроля (измерение припуска, эвольвенты, линии зуба, погрешности шага и т.п. на зубошлифовальном станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250). Например, промежуточные результаты измерения параметров зубчатого колеса после зубошлифования показали, что эти параметры не соответствуют чертежу. При этом имеется припуск на обработку. В этом случае в системе ЧПУ станка появляется рекомендация продолжить обработку. Здесь проявляется аналогия с методом пробных проходов и промеров. В этой связи указанное новое направление в технологии машиностроения является развитием теории оптимизации технических систем. Одновременно, это направление в кибернетике, которая включила в свой состав всю теорию систем линейных и нелинейных, теорию автоматического управления, теорию адаптивных и интеллектуальных систем, теорию идентификации и диагностики систем, теорию оптимизации как метода проектирования и управления.

Как отмечалось, статистическое управление качеством выделилось в отдельное направление, часто не связанное с технологией машиностроения. Для обеспечения качества выпускаемого продукта существует два метода: 1) контроль продукта (т.е. результата), 2) контроль процесса получения продукта. Известно, что контроль продукта – это дорогостоящее мероприятие из-за отсутствия прецизионных измерительных средств, в том числе датчиков информации. В тоже время контроль процесса часто является достаточным, например, в технологии изготовления материалов. Установить состав

материала часто невозможно (очень дорогостоящее мероприятие). В то же время проконтролировать долю каждого компонента в материале сравнительно легко во время осуществления процесса изготовления этого материала (контроль процесса). Сказанное не относится напрямую к технологии обработки материалов, т. к. контролируемые параметры, указанные в чертеже детали, часто невозможно получить методом прямых измерений в процессе изготовления (контроль процесса). Имеются исключения, когда средства измерения параметров заготовки непосредственно встроены в технологическую систему и управляются из единого центра программного управления (CNC контроллер). В данном случае CNC контроллер станка с ЧПУ является единым центром «слияния» всех информационных потоков на станке, которые несут информацию о контролируемых параметрах технологической системы. Под контролируемыми параметрами понимают такие сигналы, которые являются детерминированными и содержат минимальную случайную составляющую. Например, сигналы о параметрах режимов резания. В то же время для контроля процесса в режиме мониторинга и диагностики многие контролируемые параметры являются статистическими, т.е. содержат две составляющие: детерминированную (систематическую) и случайную (подчиняется какому-либо закону распределения). Статистическая природа параметра означает его неоднозначность и, следовательно, требуются отдельные математические процедуры идентификации параметра, т.е. выделение его детерминированной части за счет подавления случайной составляющей. Эти процедуры в последнее время сформировались как отдельное научное направление в технологической статистике – цифровая обработка сигналов, которая включает теории сглаживания, фильтрации и предсказания. Они являются частью более общей статистической теории оценивания. Основами этой теории являются принятые в технологическом анализе подходы: теоретико-вероятностный и частотный. Следствием этих подходов являются известные концепции статистического анализа: дисперсионный анализ (в зарубежной литературе ANOVA – ANalysis Of VAriance), планирование экспериментов (DOE – Design Of Experiments), минимум среднеквадратической ошибки (minimum-mean-square-error), максимального правдоподобия (maximum likelihood estimation), и другие статистические методы оценивания параметров (estimation methods in statistics). Все эти методы, как и указанная выше центральная предельная теорема в статистике, основаны на таких основных параметрах выборки данных, как математическое ожидание (expected value) и дисперсия (variance), которая характеризует отклонение от математического ожидания параметра. Но само математическое ожидание не является корректным, т.к. найдено по недостаточному числу измерений, поэтому отклонение от фактического

среднего значения зависит от числа измерений по Стьюденту (t-test). Здесь следует отметить, что t-test Стьюдента является частным случаем дисперсионного анализа (ANOVA), разработанного Р. Фишером.

Подводя итог статистическим методам оценивания параметров процессов, следует отметить, что большая их часть основана на решении задачи оптимизации в статистике, исходя из экстремального значения какого-либо критерия оценивания. В этом смысле оптимизация является не только методом проектирования технологической операции (process design) на этапе подготовки производства, но также распространяется на обработку сигналов системы мониторинга и диагностики операции в режиме реального времени.

5. Выводы и перспективы развития

1. Показано место нового направления в технологии машиностроения – мониторинга и технологической диагностики на станках с ЧПУ, в сравнении с классическими методами этой науки – методом пробных проходов и методом автоматического получения размеров. Установлена важность встроенных систем мониторинга и технологической диагностики в обеспечении высокой производительности труда за счёт обеспечения самодостаточности, автономности и мобильности работы станков с ЧПУ.

2. Предложены общенаучные подходы в технологическом анализе – теоретико-вероятностный и частотный, расширяющие возможности известных технологических концепций: теплофизики, динамики и статистики.

3. Показано место теории оптимизации в анализе и синтезе технологических процессов и систем на этапах производства, его подготовки и при экспериментальных исследованиях: оптимизация как метод проектирования технологических операций, планирования экспериментов и управления состоянием технологических систем.

Список использованных источников: 1. *Lou Kang-Ning*. An Intelligent Sensor Fusion System for Tool Monitoring on a Machining Centre / *Kang-Ning Lou, Chen-Jen Lin* // *Advance Manufacturing Technology*. – 1997, Volume 13, Issue 8, P.556-565. 2. *Morales-Menendez Ruben*. Sensor-Fusion System for Monitoring a CNC-Milling Center / *Ruben Morales-Menendez, Sheyla Aguilar M, Ciro A. Rogriguez, and others* // *Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science*. – Volume 3789, 2005. – P.1164-1174. 3. *Маталин А.А.* Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с. 4. *Хусу А.П.* Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / *А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов*. – М.: Гл. ред. физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975. – 344 с. 5. *Хемминг Р.В.* Цифровые фильтры: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Трахтмана. – М.: Сов. Радио, 1980. – 224 с. 6. *Лиценко Н.В.* Частотные характеристики профилограммы поверхности и вибраций при её обработке / *Н.В. Лиценко* // *Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць*. – Харків, НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 1(25). – С.94-108. 7. *Лоповок Т.С.* Волнистость поверхности и её измерение / *Т.С. Лоповок*. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 184 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Lou Kang-Ning*. An Intelligent Sensor Fusion System for Tool Monitoring on a Machining Centre / **Kang-Ning Lou, Chen-Jen Lin** // *Advance Manufacturing Technology*. – 1997, Volume 13, Issue 8, P.556-565. 2. *Morales-Menendez Ruben*. Sensor-Fusion System for Monitoring a CNC-Milling Center / *Ruben Morales-Menendez, Sheyla Aguilar M, Ciro A. Rogriguez, and others* // *Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science*. – Volume 3789, 2005. – P.1164-1174. 3. *Matalin A.A.* Tekhnologiya mashinostroeniya: Uchebnik dlya mashinostroitel'nykh vuzov po spetsial'nosti «Tekhnologiya mashinostroeniya, metallorazhushchie stanki i instrumenty». – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1985. – 496 s. 4. *Khusu A.P.* Sherokhovatost' poverkhnostey (teoretiko-veroyatnostnyy podkhod) / A.P. Khusu, Yu.R. Vitenberg, V.A. Pal'mov. –M.: Gl. red. fiziko-matematicheskoy literatury izd-va «Nauka», 1975. – 344 s. 5. *Khemming R.V.* Tsifrovye fil'try: Per. s angl./ Pod red. A.M. Trakhtmana. – M.: Sov. Radio, 1980. – 224 s. 6. *Lishchenko N.V.* Chastotnye kharakteristiki profilogrammy poverkhnosti i vibratsiy pri ee obrabotke / *N.V. Lishchenko* // *Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prats'*. – Kharkiv, NTU "KhPI", 2015. – Vip. 1(25) . – S.94-108. 7. *Lopovok T.S.* Volnistost' poverkhnosti i ee izmerenie / *T.S. Lopovok*. – M.: Izd-vo standartov, 1973. –184 s.